

· 光电器件与材料 ·

远程荧光粉形状对LED发光性能的影响

肖 华^{1,2}, 郭自泉¹, 党思佳¹, 王阳夏³, 肖 俊³, 史 园⁴

(1. 厦门大学 电子科学系, 福建省半导体照明工程技术研究中心, 福建 厦门 361005;

2. 深圳岑艺电子有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 厦门华联电子有限公司, 福建 厦门 361008;

4. 厦门市产品质量监督检验院, 国家半导体发光器件(LED)应用产品质量监督检验中心, 福建 厦门 361004)

摘 要:研究了不同驱动电流和光强分布条件下, 圆顶形、椭球形以及圆锥形远程荧光粉的发光性能。实验采用蓝光LED激发YAG:Ce³⁺荧光粉产生白光, 并通过恒流源和TEC控温热沉分别控制LED驱动电流和热沉温度, 通过对三种不同形状远程封装的荧光粉的光、色指数等进行对比, 发现椭球状样品的综合光学特性最佳, 光通量最高。同时, 三种远程荧光粉分别进行了不同电流下的Yellow-blue Ratio (YBR) 空间分布测试, 结果显示, 圆顶形样品的YBR空间分布均匀性最好, 且在不同电流下ACCTD及ACU值在三种样品中最优。相比大角度, 三种样品在0°附近测量的YBR的值都有不同程度的下降, 原因是芯片法线方向的荧光粉离光源较远, 且光通过荧光粉的光程较短, 因此激发效果与大角度出光时有差别。光源的封装形状以及荧光粉形状都成为影响光分布的重要因素, 因此通过改变远程荧光粉的封装方式, 优化出射光线路径, 可以起到改善远程荧光粉发光性能的重要作用, 对完善大功率白光LED光学特性的研究具有较好的参考价值。

关键词:LED; 远程荧光粉; 相关色温(CCT); 光强

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-01-0010-05

Impact of Remote Phosphor Shape on LED Luminous Performance

XIAO Hua^{1,2}, GUO Zi-quan¹, DANG Si-jia¹, WANG Yang-xia³, XIAO Jun³, SHI Yuan⁴

(1. Department of Electronic Science, Fujian Engineering Technology Research Center for Semiconductor Lighting, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

2. Cenyi Electronic Co. Ltd, Shenzhen 518000, China;

3. Hualian Electronic Co. Ltd, Xiamen 361008, China;

4. Xiamen Products Quality Supervision & Inspection Institute, National Testing Center for LED Application Products, Xiamen 361004, China)

Abstract: The luminous performances of remote phosphor with domed, elliptical and conical shapes under various drive currents and light intensity distributions are researched. A blue LED is used as the light source to excite YAG:Ce³⁺ phosphor to emit white light. Meanwhile, constant-current sources and TEC heat sink controllers are used to control LED driving current and heat sink temperature respectively. Comparing the optical and chromatic parameters of three remote packing phosphor samples with different shapes, it is found that the elliptical sample has the best optical characteristics and the highest luminous flux. Yellow-blue ratio (YBR) spatial distribution tests of the three kinds of remote phosphor are performed respectively under different currents. The domed sample shows the best YBR spatial distribution uniformity, ACCTD and ACU value are the best among three samples. Comparing to big angle, the YBR values of the three samples measured closed to 0° decrease at different lev-

收稿日期: 2017-01-06

基金项目: 科技部国际合作项目(2015DFG62190); 科技部港澳台科技合作专项资助项目(2015DFT10120); 国家自然科学基金(61504112, 11604285, 51605404); 福建省自然科学基金(2016R0091); 福建省经信委企业技术创新项目专项

作者简介: 肖华(1989-), 女, 主要从事LED照明以及散热的封装研究; 郭自泉(1985-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为白光LED光谱调控和失效机制。

els for the phosphor layer at the normal direction of the chip far away from the light source and shorter optical path in phosphor, so the excitation effect is different from that of the big angle exit light. Based on experimental phenomenon, shapes of light source encapsulation and phosphor layer become important factors to influence light distribution. Therefore, the exit light path is optimized through changing the packing way of the remote phosphor, which is important to improve remote phosphor illumination performances and has better reference to the research on high power white light LED optical performances.

Key words: light emitting diode (LED); remote phosphor; correlated color temperature (CCT); light intensity

蓝光LED作为普遍使用的荧光粉激发光源,一直以来都是实现高功率白光LED的重要组件,且广泛应用于平面背光源,街灯照明,车灯照明和住宅照明等照明领域^[1-2]。在提高LED发光性能的研究中,改善封装技术作为改善光效的重要方式,已成为研究重点和热点^[3]。目前,多种封装方式都被认为可以用于增强白光LED的光效,如保角形封装,平面涂覆,以及远程荧光粉封装等,其中远程荧光粉封装不但减小了反射回芯片的光子数,而且有利于芯片以及荧光粉的散热,被认为是提高光取出效率的一种封装方式^[4]。Narendran等提出的SPE(scattered photon extraction)远程荧光粉封装减小了反射回芯片的光子数,从而极大地提高了光取出效率^[5]。Kim等也通过粗化反射面结构,使得远程荧光粉封装大量减小被吸收光子的比例,提高了光取出率^[6]。虽然采用荧光粉远离激发光源的封装形式,使器件光取出率得到了提高,但光的空间的分布仍然欠缺均匀性,成为亟待解决的问题^[7]。光的空间均匀性之所以成为评价白光LED发光质量的一个重要因素,是因为其对人眼视觉的影响很大^[8]。LED的光均匀性越差,产生的白光晕圈现象越明显。不均匀的光分布,比如炫光等,能引起人眼疲劳或者失明等症状,色均匀性差可导致实际照明效果的不理想以及人眼视觉不适^[9]。

一些学者对封装引起的LED空间分布均匀性变化进行了不同程度的研究。Wang等通过蒙特卡罗光线追迹,证实了对于均匀覆盖的荧光粉层,由于光程的不同,出光颜色的不均匀性是不可避免的,并提出了用不同宽度的荧光粉层叠加的优化方法来改善荧光粉的色均匀性^[10]。Liu等曾经提到,荧光粉的用量跟光电转换效率有负相关性,且在高功率白光LED的空间色均匀性分布研究中,与半球形远程荧光粉相比,统平面涂覆和保角形涂覆的荧光粉色均匀性分别下降了36和6%左右^[11]。Kuo等利

用脉冲喷雾技术将荧光粉涂覆在硅胶上,留下较小没有涂覆荧光粉的“窗口”,该种涂覆方式虽然使光通量和光效有微弱的降低,但却很大程度上提高了空间的相关色温(correlated color temperature,即CCT)分布均匀性^[12]。

色空间分布均匀性的提升对高功率LED发光性能有重要影响。相对平面荧光粉层,曲面荧光粉层的色均匀度较差,尤其是高色温曲面荧光粉^[13]。与平面荧光粉层相比,曲面荧光粉层具有较高的光取出效率,因此改善曲面荧光粉的发光性能是研发高光效LED的重要手段。如何提高曲面荧光粉的色空间分布均匀性也是目前研究人员考虑的热点问题。

对面积较大的荧光粉层来说,蓝光LED作为理想的点光源,其芯片发出的光子到远程荧光粉不同部位的传播距离不同,且蓝光经过的光程随出射角度的变化而变化,这也是凸面荧光粉涂层不能使空间色温分布达到完全均匀的原因^[14-15]。在光子与荧光粉发生反应的过程中,荧光粉对光子有散射作用,会改变光传播的路径,因此在很大程度上影响光效和色温分布。实验证明,传统荧光粉大面积点胶的封装方式会导致荧光粉浓厚不均,空间色品均匀性差,即使是均匀的荧光粉涂层,空间色分布均匀性也并不理想^[16]。

目前,大部分有关荧光粉光空间分布均匀性的研究都仅限于仿真模拟,开展实验研究也会受到实际条件的限制,难以广泛测试。文中选取了三种具有代表性的不同形状远程荧光粉进行综合光学性质的测量和比较,从多种角度研究分析LED光、色互相影响的内在物理机制,通过调整光源,远程荧光粉的形状,优化出光路径,进而达到改善远程荧光粉的发光性能的目的。因此,研究结果对于远程荧光粉形状的设计、优化、改善以及提升大功率白光LED光学特性有重要的借鉴意义。

1 实验

1.1 实验设备

实验光学测试实验设备主要由德国 IS Spectro320 光谱仪,ISP500 积分球、LEDGON100 光强测试仪三部分组成,其中直径 500 mm 的积分球用于光能的收集,LEDGON100 光强测试仪用于对不同形状远程荧光粉封装的 LED 进行光谱空间分布测试。

1.2 实验内容

调节恒流源 (Keithley 2400) 使 LED 工作电流为 100~700 mA,同时对 LED 发光光谱进行控温测试,通过 TEC 控温热沉 (Keithley 2510) 控制 LED 管壳温度保持在 25 °C。实验中激发光源采用 BridgeLux 公司提供的 BXC B45451W 大功率蓝光 LED,其芯片大小为 1 mm×1 mm×0.01 mm,发光峰值波长在 452~455 nm 之间,半峰宽和工作电流分别为 20 nm 和 350 mA。如图 1 所示。



图 1 三种荧光粉样品示意图

样品 1 为圆顶形远程荧光粉,样品 2 为椭球形远程荧光粉,样品 3 为圆锥形远程荧光粉,三种样品的厚度约为 1 mm,高度约为 20 mm,荧光粉种类为

表 1 在 350 mA, 25 °C 下三种样品的光参数

样品	光功率 /W	光通量 /lm	峰值波长/nm	主波长 /nm	色温 /K	显色指数	光电转换效率/%	量子效率/%	光转换效率/%	发光效能/lm/W
1	0.23	78.88	454.2	564.9	5 088	81.45	20.3	74.5	58.9	241.4
2	0.25	81.41	454.4	552.2	5 424	84.24	21.8	77.49	60.8	244.6
3	0.22	74.66	454.5	557.6	5 396	83.85	19.5	70.23	54.3	227.8

结果显示,样品 2 不但光通量最高,而且其他各方面光参数都取得了相对优良的值,如光电转换效率,量子效率,光转换效率,和发光效能等。样品 1 的发光效率和样品 2 差别不大,但主波长较长,且相关色温和显色指数最低。样品 3 的几种发光效率最低,但色温和显色指数和样品 2 差别不大。

YAG:Ce³⁺。

2 结果和分析

2.1 光谱测试结果和分析

在蓝光 LED 的激发下,三种样品的光谱形状如图 2 所示。

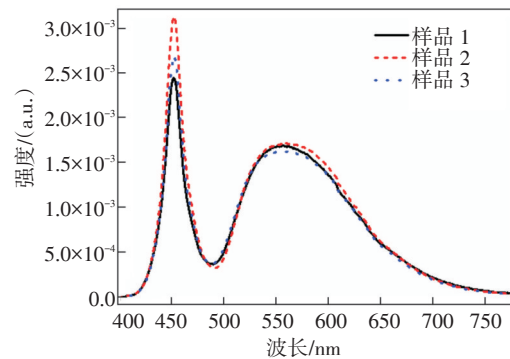


图 2 工作电流 350 mA,热沉温度 25 °C 下三种样品的光谱分布

其中,样品 2 的蓝光和黄光波峰较高,样品 1 蓝光波峰最低,样品 3 的黄光波峰最低。样品光谱形状的不同可能受以下两种因素的影响:(1)由于形状不同,三种荧光粉样品与激发蓝光的接触表面积不同;(2)三种荧光粉样品的形状不同,会造成表面光子的入射角各异,因此光在荧光粉中传播的光程以及光分布的均匀性也不同。

表 1 给出了样品在工作电流 350 mA,热沉温度 25 °C 下的常用光、色光参数。

2.2 光空间分布均匀性与 YBR 测试

如图 3 所示,对光谱曲线在可见光 380~780 nm 范围内进行积分即可得到 LED 的总辐射通量。

以光谱曲线中两峰值波长之间最低能量处的波长为界,对光谱曲线在小于此波长的范围内进行积分可得到 LED 蓝光部分的辐射通量;对光谱曲线

在大于此范围内进行积分可得到LED黄光部分的辐射通量^[17]。按此积分规则,对光谱曲线进行积分,得到总辐射能量,蓝光辐射通量,黄光辐射通量,由此可计算出黄光辐射通量和蓝光辐射通量的比值,简称YBR。荧光粉的发光性质中,相关色温是衡量其发光品质的重要因素,而相关色温的变化跟白光的YBR有密切关系。

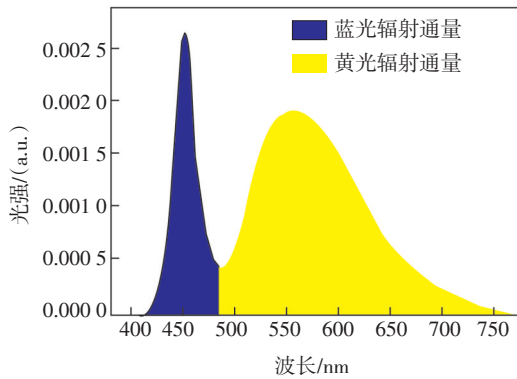
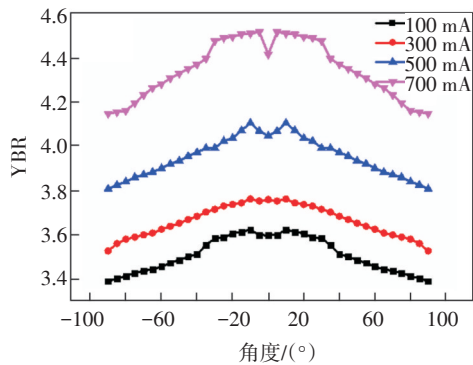
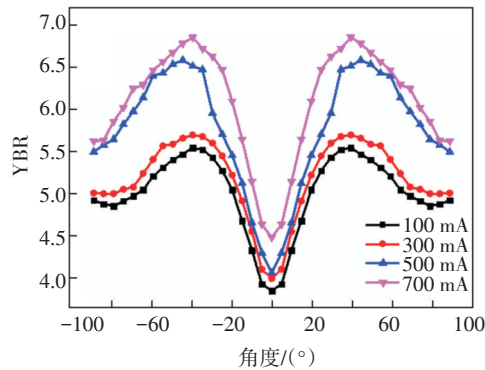


图3 YBR计算示意图

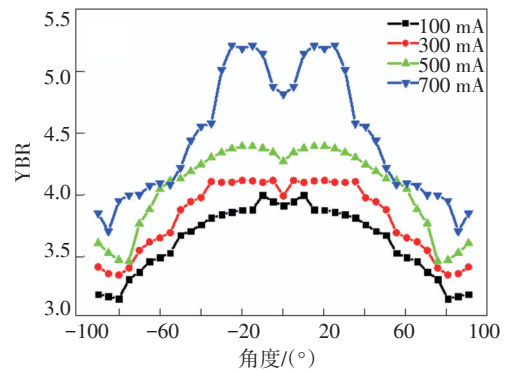
图4给出三种样品分别在100, 300, 500和700 mA下空间-90°~90°的YBR分布。



(a)样品1在空间-90°~90°不同电流下的YBR分布



(b)样品2在空间-90°~90°不同电流下的YBR分布



(c)样品3在空间-90°~90°不同电流下的YBR分布

图4 样品1,样品2,样品3在空间-90°~90°不同电流下的YBR分布

结果显示,三种样品的YBR空间分布形状完全不同,且都在0°附近出现了不同程度的下降,此现象在高电流下更为显著。原因一方面是光源从0°出光到达荧光粉的距离比大角度出光到达荧光粉的距离远。另一方面,根据YBR的计算公式,其值和产生的黄光所占比例有关,而黄光的产生和蓝光的传播方向以及通过的荧光粉层厚度有关。一般来说,蓝光往0°方向穿过的荧光粉厚度最薄,因此产生的黄光比例较低;当光的发射角度增大,蓝光斜着穿过荧光粉层,黄光比例开始增加,当接近90°方向时,黄光比例又开始减小,因此产生的YBR会不断变化。对于半球形荧光粉层来说,蓝光无论往哪个方向传播,荧光粉层内光程的变化不大,因此样品1的YBR随角度变化最小。

色温空间均匀性 (angular color uniformity, 即ACU)是衡量远距离荧光粉封装的光学特性的一个重要参数。Liu等人将ACU定义为-90°~90°空间中, YBR的最小值和最大值之比^[11],即

$$ACU = YBR_{\min} / YBR_{\max} \quad (1)$$

根据定义,ACU值越大,空间的色温分布均匀性越好。如表2所示。

表2 三种样品不同电流下的ACU变化

ACU/mA	样品1	样品2	样品3
100	0.938	0.884	0.828
300	0.936	0.875	0.821
500	0.928	0.831	0.798
700	0.918	0.816	0.738

样品1的ACU值以及大电流下的稳定性是三种样品中最高的,样品3各个参数为最低。三种样品的ACU值随着流的增大,呈降低趋势。一方面,电流的增大,会使光通量增大,荧光粉可以更充分地 and 蓝光光子产生反应;另一方面,随着电流增大,蓝光会出现过饱和的情况,即大量蓝光没有与荧光粉反应生成黄光,且在荧光粉腔内大量散射,改变光分布,因此会导致其ACU值产生变化。

为了进一步衡量三种样品的色温空间分布情况,引入ACCTD (angular CCT deviations),即角向CCT误差^[18],计算结果如图5所示。

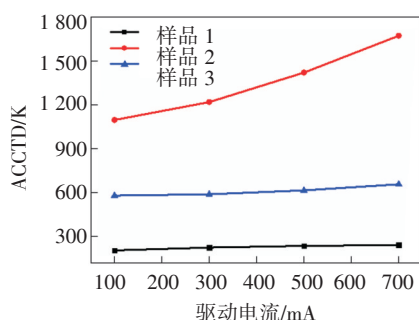
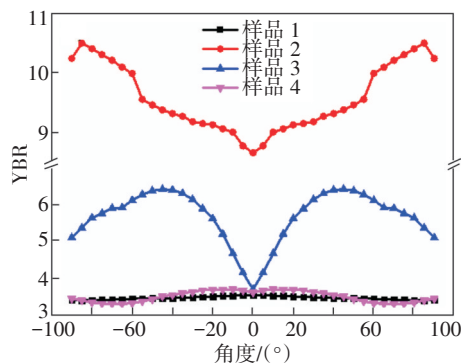


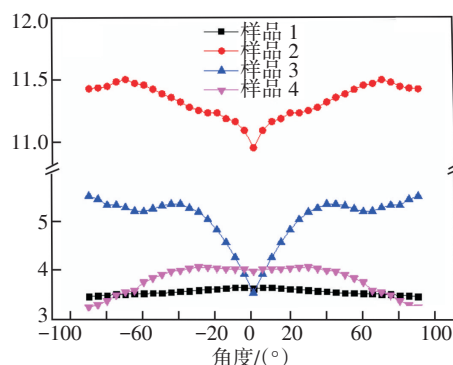
图5 三种样品的ACCTD在不同电流下的变化

在大电流下,三种样品的ACCTD呈增大趋势,且样品2在大电流下的增幅远大于其他样品。相比之下,样品1的ACCTD值保持在160 K左右,为三种样品中的最小值,说明其相关色温随空间角度的变化最小,与表2中的实验结果相符。

激发光源的光分布以及被激发荧光粉的CCT不同可能会造成YBR空间分布的不同。因此,实验控制激发光源驱动电流为350 mA,添加样品4为新增实验对象,即形状和样品1相同,但色温为低色温的远程荧光粉。四种样品分别用半球形和平面型硅胶封装的蓝光LED作为激发光源进行测试,其YBR空间均匀性分布如图6a和图6b所示。



(a)半球形硅胶封装的蓝光LED激发下的YBR空间分布



(b)平面硅胶封装的蓝光LED激发下的YBR空间分布

图6 工作电流为350 mA,热沉温度25 °C下,四种样品在半球形硅胶封装的蓝光LED和平面硅胶封装的蓝光LED激发下的YBR空间分布

实验结果显示,半球形硅胶封装蓝光LED激发下,样品1的ACU为0.956,远远高于其他样品的ACU值,也就是说样品1的YBR空间分布均匀性良好。样品2的YBR值远高于其他样品,说明样品2的黄光成分远高于其蓝光成分,即光转换效率较高,这与表1的实验结果相符合。对比样品1和样品4,其YBR分布在不同色温下差别并不明显,说明色温对其YBR分布影响不大。

将图6a和图6b进行对比,发现平面硅胶封装的蓝光LED作为激发源仅对样品2和样品3的色空间分布起到了较好的调节作用,但对样品1和样品3的YBR分布没有起到太大调整的作用。这说明不同形状的远程荧光粉要根据本身的几何特性来选择合适的激发光源,才能起到较好的激发效果,形成高质量的白光。

3 结论

研究了不同驱动电流和不同光源激发条件下,圆顶状、椭球状以及圆锥状远程荧光粉的综合发光性能。结果显示,椭球状远程荧光粉各方面综合光学性能较佳,但色稳定性在大电流条件下不如其他样品。圆顶状远程荧光粉的ACCTD值随电流变化的稳定性以及YBR空间分布均匀性远高于其他样品,且在不同色温样品的YBR分布区别不大。椭球状以及圆锥状远程荧光粉的YBR空间分布受不同形状的光源影响较大。综合以上实验结果,远程荧光粉形状对光空间分布较其他因素的影响较大,因

(下转第55页)

- [6] Lai C C, Tsai C C. Digital image watermarking using discrete wavelet transform and singular value decomposition [J]. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, 2010, 59(11): 3060-3063.
- [7] 何冰,朱志平.基于对数极坐标下的SVD数字水印算法[J]. *计算机与数字工程*, 2011, 39(10):138-141.
- [8] 刘丽,周亚建,张斌,等.基于DCT和SVD的QR码数字水印算法[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(S2):304-311.
- [9] 于海娇,孙刘杰,李毓彬,等.基于QR码的DWT-SVD数字水印算法[J]. *包装工程*, 2015(23):125-129.
- [10] 龚冬梅,顾济华,陈大庆,等.基于QR码的抗几何攻击数字全息水印[J]. *包装工程工程版*, 2015, 36(9):124-128, 138.

(上接第14页)

此在实际操作中要根据荧光粉形状的几何特性,优化出光路径,配合适当的激发光源,才能得到理想的白光。

参考文献

- [1] ZHU Yi-ting, Narebdran Nadarajah. Optimizing the performance of Remote Phosphor LEDs[J]. *J Light&Vis. Env*, 2008, 32(2):115-119.
- [2] CHUNG Shang-chao, HO Pei-chen, LI Dunru. Effect of chip spacing on light extraction for light-emitting diode array[J]. *Opt Express*, 2015, 23(11): A640-A649.
- [3] CHEN Kuo-ju, CHEN Hsin-chun, SHIH Min-hsiung, et al. Enhanced luminous efficiency of WLEDs using a dual-layer structure of the remote phosphor package[J]. *J. Lightwave Technol*, 2013, 31(12): 1941-1945.
- [4] HUANG Hsin-tao, HUANG Yi-pai, TSAI Chuang-chuang, et al. Planar lighting system using array of blue LEDs to excite yellow remote phosphor film[J]. *J Disp Technol*, 2011, 7(1):44-51.
- [5] Narendran N, GU Y, Freyssonier-Nova J P, et al. Extracting phosphor-scattered phosphors to improve white LED efficiency[J]. *Phys Stat Sol*, 2015, 202(6): R60-R61.
- [6] KIM Jong Kyu, LUO Hong. Strongly enhanced phosphor efficiency in GaInN white light-emitting diodes using remote phosphor configuration and diffuse reflector cup[J]. *Jpn J Appl Phys*, 2005, 44(5L): L649.
- [7] Keppens A, Denijs S, Wouters S, et al. Modelling the spatial colour distribution of phosphor-white high power light-emitting diodes[J]. *SPIE*, 2010, 77(17):77170J-1-77170J-10.
- [8] 徐国芳,饶海波,余心梅,等.白光LED光斑均匀性的改进[J]. *发光学报*, 2008, 29(4): 707-712.
- [9] SUN Ching-cherng, CHEN Ching-yi, CHEN Cheng-chien, et al. High uniformity in angular correlated-color-temperature distribution of white LEDs from 2800K to 6500K[J]. *Opt Express*, 2012, 20(6): 6622-6630.
- [10] WANG Si-min, CHEN Xing, CHEN Ming-xiang, et al. Improvement in angular color uniformity of white light-emitting diodes using screen-printed multilayer phosphor-in-glass[J]. *Appl Optics*, 2014, 53(36): 8492-8498.
- [11] LIU Zong-yuan, WANG Kai, LUO Xiao-bing, et al. Realization of high spatial color uniformity for white light-emitting diodes by remote hemispherical YAG: Ce phosphor film[C]//2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2010: 1703-1707.
- [12] KUO Hao-chung, HUNG Cheng-wei, CHEN Hsin-chu, et al. Patterned structure of remote phosphor for phosphor-converted white LEDs[J]. *Opt Express*, 2011, 19(104): A930-A936.
- [13] LIU Zong-yuan, LIU Sheng, WANG Kai, et al. Studies on optical consistency of white LEDs affected by phosphor thickness and concentration using optical simulation[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 2010, 33(4): 680-687.
- [14] 刘志彬,钱可元,罗毅.荧光粉层形状对白光LED空间色温均匀性的影响[J]. *半导体光电*, 2012, 33(5): 651-655.
- [15] 宋国,缪建文,施建珍,等.一种提高白光LED相关色温分布均匀性的方法[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(7): 983-987.
- [16] CHEN Hsin-chu, CHEN Kuo-ju, LIN Chien-chung, et al. Improvement in uniformity of emission by ZrO₂ nanoparticles for white LEDs[J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(26): 265201.
- [17] SU Qiang, PEI Zhi-wu, CHI Li-sheng, et al. The yellow-to-blue intensity ratio (Y/B) of Dy³⁺ emission[J]. *J Alloy Compd*, 1993, 192(1): 25-27.
- [18] CHEN Hai-wei, LUO Zhen-yue, ZHU Rui-dong, et al. Tuning the correlated color temperature of white LED with a guest-host liquid crystal[J]. *Opt Express*, 2015, 23(10): 13060-13068.